

Wojciech KACALAK^{1*}
Dariusz LIPIŃSKI¹
Błażej BAŁASZ¹
Ryszard ŚCIEGIENKA¹

ANALIZA ODKSZTAŁCEŃ MECHANICZNYCH AUTOMATYCZNEJ SZLIFIERKI Z UKŁADEM N-WRZECIENNIKÓW DO OBRÓBKİ MAŁYCH ELEMENTÓW CERAMICZNYCH

Operacje obróbki ścierniej jako operacje końcowe w całym procesie obróbki mają decydujący wpływ na dokładność kształtową i wymiarową obrabianych elementów. Istotną grupą przyczyn niedokładności wpływających na dokładność obrabianych elementów są odkształcenia układu obróbkowego wynikające z oddziaływania sił szlifowania. W pracy dokonano analizy wpływu odkształceń układu technologicznego w procesie automatycznego szlifowania małych elementów ceramicznych. Określono zależności umożliwiające określenie wielkości odchyłek położenia względnego przedmiotu obrabianego oraz narzędzia ściernego dla układu N wrzecienników. Przeprowadzona analiza umożliwia określenie wielkości odkształceń układu obróbkowego w zależności od rozkładu naddatku na poszczególne wrzecienniki oraz umożliwia określenie miejsc zamocowań wrzecienników realizujących zabiegi obróbki końcowej, decydującej o dokładności wymiarowej obrabianych elementów.

1. WPROWADZENIE

Operacja obróbki ścierniej jako operacja końcowa w całym procesie obróbki w zasadniczym stopniu decyduje o ostatecznych właściwościach użytkowych wyrobu. Dokładność wymiarów i kształtu obrabianych elementów odgrywa istotną rolę przy kojarzeniu elementów współpracujących ślizgowo, tocznie lub spoczynkowo, zapewniając uzyskanie odpowiedniego luzu, wcisku lub też szczelności połączenia.

Analiza literatury pozwala wyodrębnić obszerny zbiór cech charakteryzujących procesy obróbki materiałów ceramicznych. Na charakterystyczne cechy procesu szlifowania materiałów ceramicznych, mogące wpływać na odchyłki wymiarów i kształtu obrabianych elementów składają się m. in.: siły szlifowania [1],[3], drgania [5], sztywności układu OUPN [10] i narzędzi ściernych [12], zużycie narzędzia [2] oraz cechy materiałów obrabianych i samego mechanizmu obróbki materiałów kruchych [9]. Zagadnienia

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Koszalin

* E-mail: wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl

dotyczące analizy sztywności statycznej obrabiarek oraz ich dokładności technologicznej podejmowane były w wielu pracach badawczych [4],[9],[7],[8],[11]. W procesie szlifowania głównymi przyczynami niedokładności są odchyłki położenia przedmiotu i narzędzia oraz ich odkształcenia, a także odchyłki wymiaru ściernicy następujące w wyniku jej zużywania się [6].

W niniejszej pracy dokonano analizy wpływu sił szlifowania na odchyłki wzajemnego położenia przedmiotu obrabianego i narzędzia ściernego. Analizę niedokładności i skutków ich wystąpienia oraz rozważania teoretyczne przeprowadzono ze szczególnym uwzględnieniem procesu automatycznej obróbki małych materiałów ceramicznych z wykorzystaniem szlifierki automatycznej AU-16 (rys. 1).



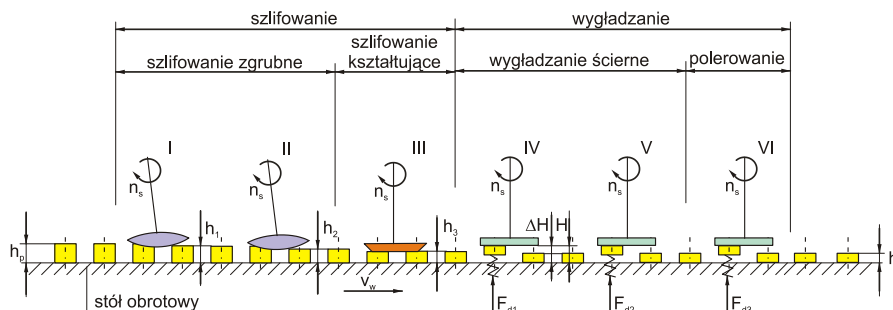
Rys.1. Szlifierka do automatycznej obróbki elementów ceramicznych
Fig. 1. The grinder to automatic processing of the ceramic elements

2. CHARAKTERYSTYKA ZAUTOMATYZOWANEJ METODY OBRÓBK ELEMENTÓW CERAMICZNYCH

W analizowanej metodzie obróbki zespołem ściernic, z wykorzystaniem metody czołowego szlifowania ściernicami diamentowymi o specjalnie ukształtowanych powierzchniach czynnych (stożkowych lub hiperboloidalnych), możliwe jest usuwanie dużych nadatków obróbkowych z wysoką wydajnością objętościową oraz wysoką dokładnością kształtu wymiarów. Całkowity nadatek do usunięcia został podzielony między kilka ściernic rozmieszczonych na obwodzie stołu obrotowego z umieszczonymi na nim przedmiotami (rys. 2).

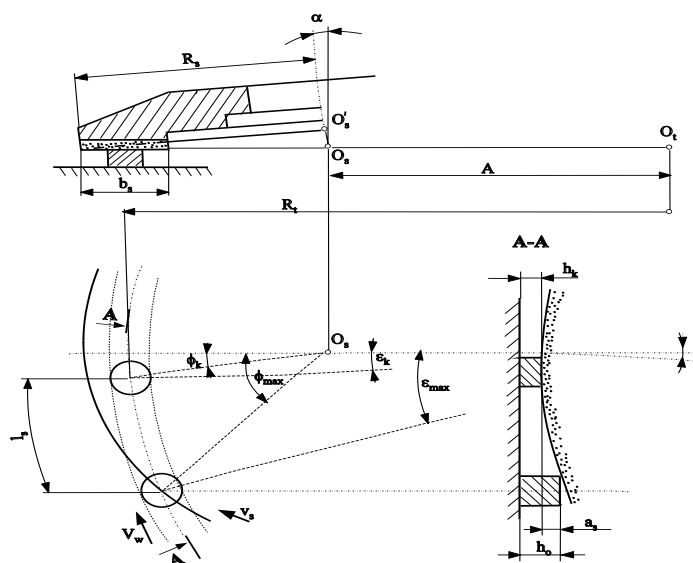
Przedmioty przemieszczają się wraz ze stołem przechodząc pod kolejnymi ściernicami, usuwającymi coraz mniejsze wielkości nadatku. Elementy, umieszczone w gniazdach stołu obrotowego, są obrabiane najpierw przez gruboziarniste ściernice diamentowe (rozmiar ziarna od 200 μm do 125 μm), następnie kształtująco przez drobnoziarniste ściernice diamentowe (rozmiar ziarna od 63 μm do 50 μm) i wygładzane przez ściernice zawierające mikroziarna diamentowe (rozmiar ziarna od 5 μm do 3 μm), mikroziarno z węgla krzemu lub przez ceramiczne tarcze ściernic wygładzająco-

polerujące. Podczas obróbki zgrubnej i kształtującej elementy są ustalane na powierzchni stołu obrotowego, a podczas obróbki wykańczającej są unoszone i elastycznie dociskane do czynnych powierzchni narzędzi wygładzających i polerujących.



Rys. 2. Metoda zintegrowanej obróbki elementów ceramicznych w cyklu automatycznym
 Fig. 2. The integrated processing methods of the ceramics elements in automatic cycle

Przedmioty przemieszczają się wraz ze stołem przechodząc pod kolejnymi ściernicami, usuwającymi coraz mniejsze wielkości naddatku. Elementy, umieszczone w gniazdach stołu obrotowego, są obrabiane najpierw przez gruboziarniste ściernice diamentowe (rozmiar ziarna od 200 μm do 125 μm), następnie kształtująco przez drobnoziarniste ściernice diamentowe (rozmiar ziarna od 63 μm do 50 μm) i wygładzane przez ściernice zawierające mikroziarna diamentowe (rozmiar ziarna od 5 μm do 3 μm), mikroziarno z węgla krzemu lub przez ceramiczne tarcze ściernicowe wygładzająco-polerujące. Podczas obróbki zgrubnej i kształtującej elementy są ustalane na powierzchni stołu obrotowego, a podczas obróbki wykańczającej są unoszone i elastycznie dociskane do czynnych powierzchni narzędzi wygładzających i polerujących.

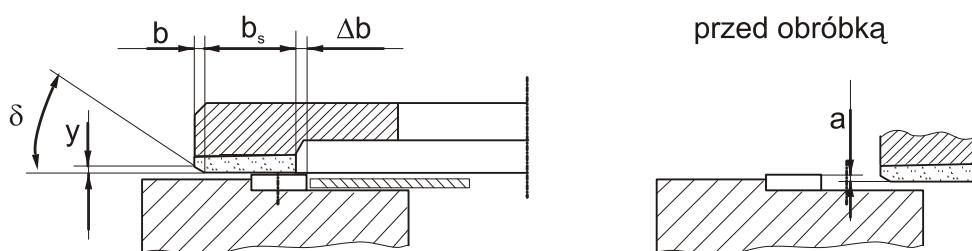


Rys. 3. Schemat zastosowanej metody szlifowania zgrubnego
 Fig. 3. Scheme of rough grinding method

Obróbka ściernicami I, II i III, której celem jest usunięcie dużych naddatków obróbkowych prowadzona jest z użyciem ściernic pochyłonych względem płaszczyzny toru przedmiotów. Zastosowana metoda dzięki odpowiedniej kinematyce układu obróbkowego i pochyleniu narzędzia, pozwala na dokładną i wydajną obróbkę przedmiotów, poruszających się po torze przesuniętym względem środka ściernicy (rys. 3).

Ściernica pierścieniowa do szlifowania czołem powierzchni czynnej w kształcie stożka jest pochyłona w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach: w płaszczyźnie stycznej do toru ruchu przedmiotów o kąt β oraz w płaszczyźnie prostopadłej do poprzedniej i przechodzącej przez oś ściernicy o kąt α . Pochylenie o kąt β wpływa na długość drogi szlifowania i w przypadku przedmiotów ustalanych z wykorzystaniem siły obróbki oraz oporowego obrzeża pozwala na zakończenie procesu w strefie, w której składowa promieniowa siły szlifowania dociska jeszcze obrobione elementy do tego obrzeża.

Obróbka kształująca (strefa III, rys. 2) prowadzona jest ściernicą, której powierzchnia robocza posiada zewnętrzny nakrój o kącie δ i szerokości b , a w środkowej części jest płaska i równoległa do powierzchni stołu (rys. 4).



Rys. 4. Schemat zastosowanej metody obróbki kształtującej

Fig. 4. Scheme of finish grinding method

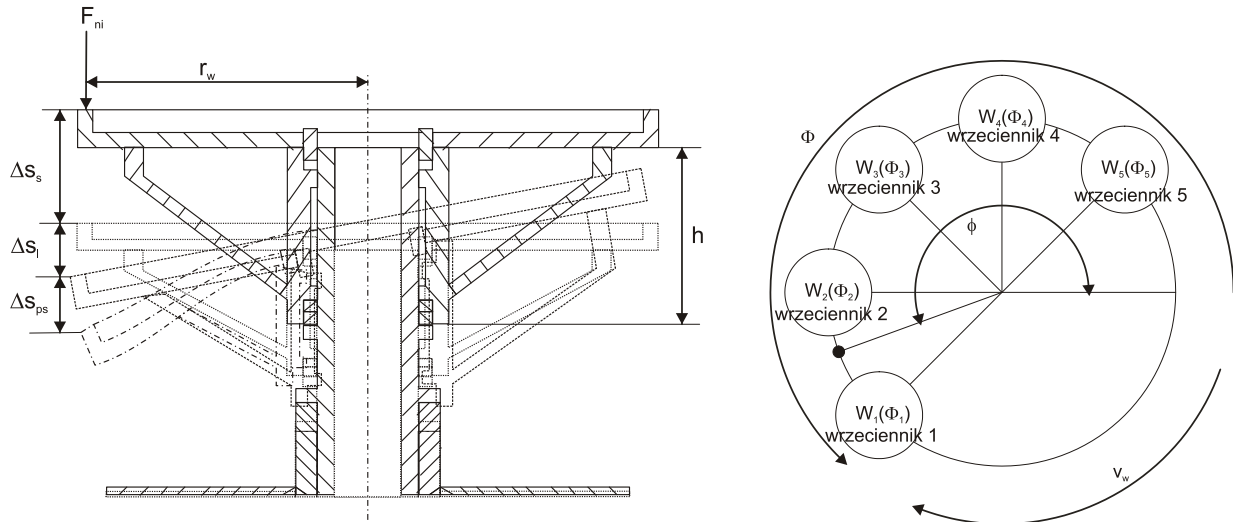
Przedmiot obrabiany ma wówczas kontakt z całą powierzchnią czynną ściernicy na całej drodze przejścia pod ściernicą, przy czym nadatek obróbkowy usuwany jest przez nakrój o kącie δ , a płaska powierzchnia ściernicy służy do wyiskrzania.

3. DOKŁADNOŚĆ GEOMETRYCZNA UKŁADU OUPN

Siły występujące w procesie szlifowania wpływają nie tylko na jakość powierzchni obrobionej, ale powodując odkształcenia układu OUPN przyczyniają się do powiększenia odchyłek kształtu i wymiarów przedmiotu obrabianego. Na odkształcenia układu OUPN Δ_z , w analizowanej metodzie automatycznej obróbki materiałów ceramicznych, składają się w głównej mierze odkształcenia stołu obróbkowego Δ_{s_z} oraz układu wrzecienników Δ_{w_z} pod wpływem działających na nie sił szlifowania:

$$\Delta_z = \Delta_{s_z} + \Delta_{w_z} \quad (1)$$

Odształcenia stołu Δs_z w kierunku osi z są wynikiem: pochylenia stołu w granicach luzu Δs_l , odkształceń sprężystych stołu Δs_s i odkształceń sprężystych podstawy stołu Δs_{ps} .



Rys. 5. Schemat przyjęty do obliczeń odkształceń stołu pod wpływem działającej na niego siły szlifowania
 Fig. 5. Scheme for calculation of deformation of the grinder table under the grinding force

Odształcenie w kierunku osi z zależne jest od wartości sił działających w poszczególnych strefach obróbki. Składowa normalna siły szlifowania na i -tym wrzecienniku zależna jest od wielkości nadatku a :

$$F_{ni} = f(a_i) \tag{2}$$

Przy założeniu, że w układzie łożyskowania stołu na długości h występuje luz Δl , to przemieszczenie stołu w punkcie odległym o kąt ϕ od punktu przyłożenia siły wynosić będzie:

$$\Delta s_l(\phi) = r_w \cdot \frac{\Delta l}{h} \cdot \cos(\phi) \tag{3}$$

gdzie: r_w – promień stołu.

Odształcenie sprężyste stołu $\Delta s_s(\phi)$ w punkcie odległym o kąt ϕ od punktu przyłożenia siły, przy założeniu sztywności stołu $(k_s)_z$ w osi z wynosi:

$$\Delta s_s(\phi) = \frac{F_{ni}(a_i)}{(k_s)_z} \cdot fun(\phi) \tag{4}$$

gdzie: $fun(\phi)$ - funkcja odkształceń ujmująca zależność pomiędzy miejscem przyłożenia siły a odkształceniami w punkcie odległym o kąt ϕ .

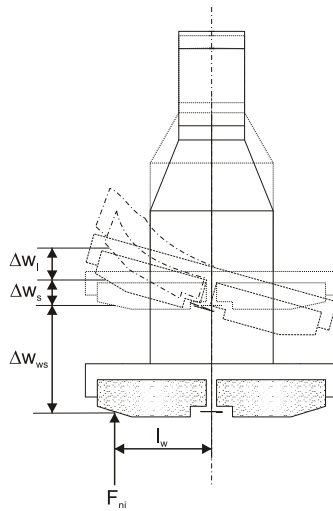
Ugięcie sprężyste podstawy stołu Δs_{ps} w punkcie przyłożenia siły, przy założeniu sztywności podstawy stołu $(k_p)_z$ w osi z określić można zależnością:

$$\Delta s_{ps} = \frac{F_{ni}(a_i)}{(k_p)_z} \cdot fun(\phi) \quad (5)$$

Uwzględniając powyższe zależności, sumaryczne odkształcenia stołu Δs_z w dowolnym punkcie stołu odległym o kąt ϕ , przy założeniu sił działających z N wrzecienników odległych odpowiednio o kąty $\Phi_1 \div \Phi_N$ wynosi:

$$\Delta s_z(\phi, \Phi) = \sum_{i=1}^N \left[\left(r_w \cdot \frac{\Delta l}{h} \cdot \cos(\phi - \Phi_i) \right) + \frac{F_{ni}(a_i) \cdot fun(\phi - \Phi_i) \cdot \left((k_s)_z + (k_p)_z \right)}{(k_s)_z \cdot (k_p)_z} \right] \quad (6)$$

Na odchyłkę położenia tworzącej powierzchni czynnej ściernicy (tworząca kształtująca ostatecznie powierzchnię przedmiotu obrabianego) składają się odkształcenia poszczególnych jego zespołów $(\Delta w_i)_z$ oraz odkształcenia układu nośnego $(\Delta p)_z$. Rozpatrując odkształcenia i -tego zespołu wrzeciennika $(\Delta w_i)_z$ w kierunku osi z (rys. 6) jako: odkształcenia ściernicy w granicach luzu Δw_l , odkształcenia sprężyste ściernicy Δw_s oraz odkształcenie sprężyste układu wrzeciennika Δw_{ws} możliwe jest obliczenie jego odkształceń na podstawie zależności 3, 4 i 5.

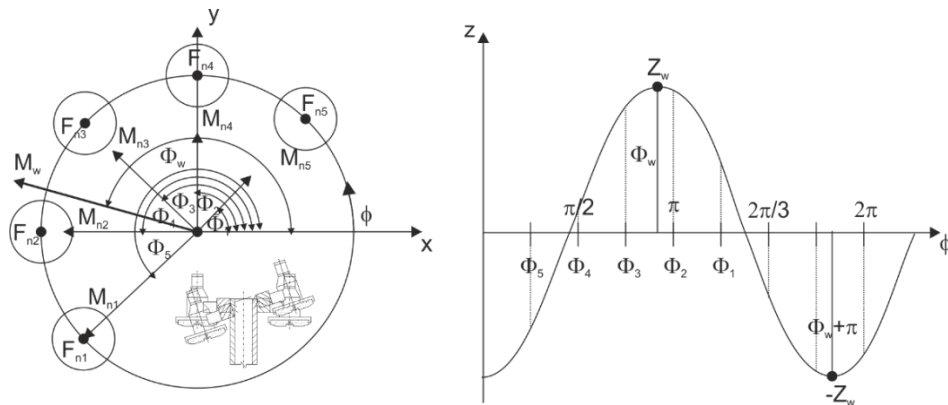


Rys. 6. Schemat przyjęty do obliczeń odkształceń zespołu wrzeciennika
Fig. 6. Scheme for calculation of headstock system deformation

Obciążenia zespołu wrzeciennika siłami szlifowania poprzez układ nośny wpływają na odkształcenia pozostałych układów wrzecienników (rys. 7), przy czym stopień tego wpływu zależy od sztywności elementów obrabiarki k .

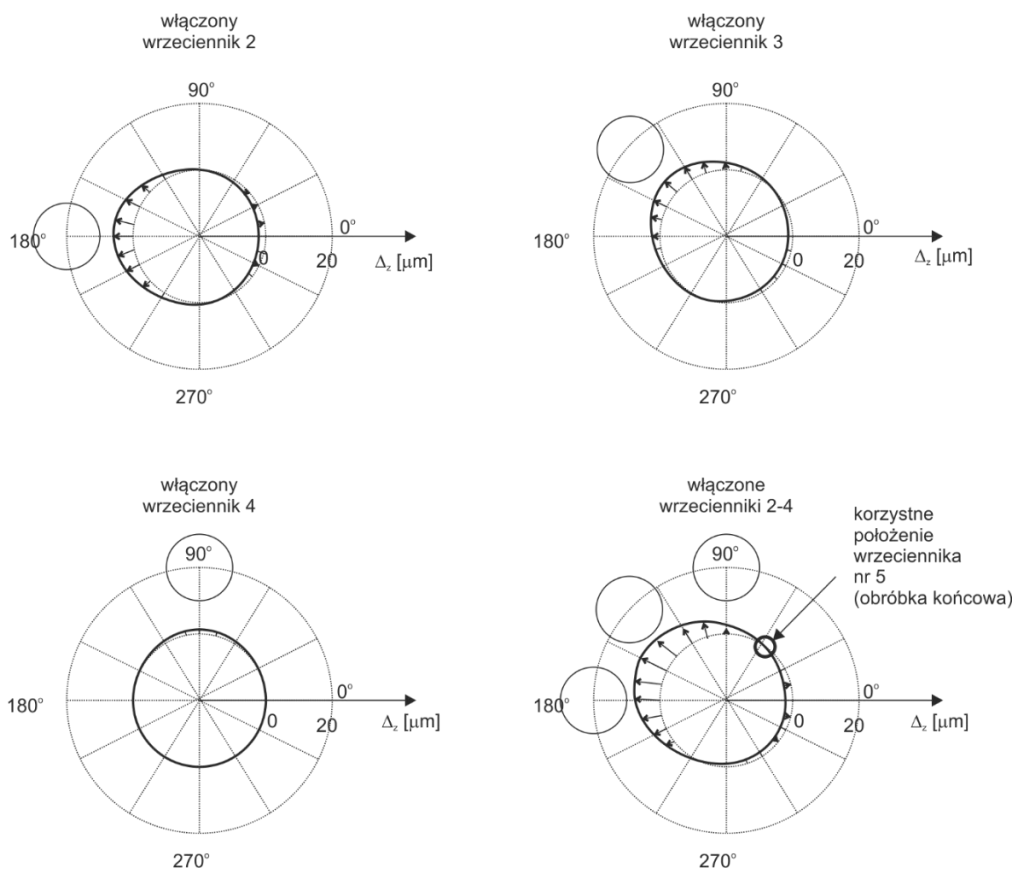
Siły działające na poszczególne zespoły wrzecienników F_{ni} skutkują pojawieniem się momentu M_w odpowiedzialnego za odkształcenia układu nośnego $(\Delta u)_z$ zgodnie z zależnością:

$$(\Delta u)_z(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^N F_{ni}}{k} \cdot \cos(\phi) \quad (7)$$



Rys. 7. Schemat przyjęty do obliczeń odkształceń układu wrzecienników oraz ich elementów nośnych
 Fig. 7. Diagram for calculation of deformation of the headstocks and their support element

Przykładowe graficzne zestawienie wartości odkształceń układu OUPN pod wpływem sił działających z 3 wrzecienników odległych odpowiednio o kąt 180, 135 i 90 stopni od osi x i wynoszących odpowiednio $F_{n2} = 120$ N, $F_{n3} = 100$ N i $F_{n4} = 30$ N przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Odchyłka położenia ściernicy względem przedmiotu obrabianego w wyniku odkształceń układu OUPN pod wpływem działających na niego sił: a) $F_{n2}=120$ N, b) $F_{n3}=100$ N, c) $F_{n4}=30$ N, d) $F_{n2} \div F_{n4}$
 Fig. 8. Deviation of the position of the grinding wheel and the workpiece as a result of deformation of the machine loop under the influence of grinding forces: a) $F_{n2}=120$ N, b) $F_{n3}=100$ N, c) $F_{n4}=30$ N, d) $F_{n2} \div F_{n4}$

Znajomość wpływu sił szlifowania występujących w procesie obróbki na odkształcenia układu OUPN pozwala na odpowiedni dobór miejsc zamocowania wrzecienników docierających i polerujących. Montaż wrzecienników pod kątem ϕ_0 spełniającym warunek:

$$\forall_{\phi_0 \in \Phi} \Delta_z \rightarrow \min \quad (8)$$

zapewnia minimalizację skutków wpływu odkształceń układu OUPN na uzyskiwane w procesie dokładności wymiarowe i kształtowe obrabianych elementów.

4. PODSUMOWANIE

Technologia większości elementów z tworzyw ceramicznych stosowanych w budowie przyrządów, maszyn oraz elektronice i elektrotechnice przewiduje w końcowej fazie procesu operacje obróbki ścierniej, których celem jest zmniejszenie odchyłek wymiaru. Dokładność wymiarów i kształtu odgrywa istotną rolę w wypadku kojarzenia elementów współpracujących ślizgowo, tocznie lub spoczynkowo zapewniając uzyskanie odpowiedniego luzu, wcisku lub też szczelności połączenia.

W pracy wyznaczono zależności umożliwiające określenie wielkości odkształceń względnych między przedmiotem obrabianym a narzędziem dla procesu automatycznego szlifowania małych elementów ceramicznych zespołem N wrzecienników.

Przeprowadzona analiza umożliwia określenie wielkości odkształceń układu obróbkowego w zależności od rozkładu naddatku na poszczególne wrzecienniki oraz umożliwia określenie miejsc zamocowań wrzecienników realizujących obróbkę końcową, decydującą o dokładności wymiarowej obrabianych elementów. Opracowane zależności umożliwiają przeprowadzenie optymalizacji rozkładu naddatku sumarycznego na poszczególne wrzecienniki, tak aby kompensować odkształcenia układu wywołane siłami szlifowania.

LITERATURA

- [1] BADGER J.A., TORRANCE A.A., 2000, *A comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography*, Int. J. Mach. Tools Manufact, 40, 1099-1120.
- [2] BORKOWSKI J., 1983, *Elementarne zjawiska zużycia ziaren i narzędzi ściernych*, Monografie, Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Koszalin.
- [3] DREW S.J., MANNAN M.A., ONG K.L., STONE B.J., 2001, *The measurement of forces in grinding in the presence of vibration*, Int. J. Mach. Tools Manufact, 41, 509-520.
- [4] GRZYWOCZ J., 2014, *Obliczenia zespołów obrabiarek w zintegrowanych środowiskach ADAMS i ANSYS*, Inżynieria Maszyn, 19/1, 7-19.
- [5] INASAKI I., KAPRUSCHEWSKI B., LEE H. S., 2001, *Grinding charter - origin and suppression*, Annals of the CIRP, 50/2, 515-534.
- [6] KACALAK W., LIPIŃSKI D., KRZYŻYŃSKI T., LENARTOWICZ M., 2002, *On applications of hybrid systems to deformation compensation in processes of fine machining*, Artificial Neural Network in Engineering, ANNIE November, 10-13, 919-925.

- [7] KOWALSKI T., JASTRZEBSKI R., 2012, *Metody oceny dokładności technologicznej precyzyjnych tokarek CNC*, Inżynieria Maszyn, 17/2, 31-37.
- [8] MAJDA P., 2011, *Pomiar i kompensacja błędów geometrycznych obrabiarek CNC*, Inżynieria Maszyn, 16/1-2, 126-134.
- [9] OCZOŚ K., 1996, *Kształtowanie ceramicznych materiałów technicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- [10] ROWE W.B., MORGAN M.N., 1993, *The effect of deformation on the contact area in grinding*, Annals of the CIRP, 42/1, 409-412.
- [11] TUREK P., KWAŚNY W., JĘDRZEJEWSKI J., 2010, *Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek*, Inżynieria Maszyn, 15/1-2, 7-37.
- [12] ZHANG B., 2001, *An investigation of the effect of machine loop stiffness on grinding of ceramics*, Annals of the CIRP, 50/1, 209-212.

ANALYSIS OF MECHANICAL DEFORMATION OF AUTOMATIC GRINDER WITH N-HEADSTOCKS SYSTEM FOR GRINDING SMALL CERAMICS ELEMENTS

The grinding operation as final in the material processing cycle crucially determines the accuracy of the shape and dimensions of the workpieces. The study analyzes the effect of deformation of the headstocks in the automatic grinding of small ceramic elements. The relationships for specifying the value of relative displacement between the workpiece and the grinding tool for the N headstocks have been developed. The analysis allows to determine the machine deformation, depending on the distribution of allowance for individual headstocks.

Keywords: *grinding, position deviation, strain, ceramic*